

# 地質情報を用いたトンネル施工管理と多成分弾性波反射法による切羽前方予測に関する研究

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 大沼 和弘   |
| 号      | 2   |
| 学位授与番号 | 28  |
| URL    | <a href="http://hdl.handle.net/10097/37899">http://hdl.handle.net/10097/37899</a> |

|                   |   |
|-------------------|---|
| 氏 名               | おおぬま かずひろ                                 |
| 授 与 学 位           | 大 沼 和 弘                                   |
| 学 位 記 番 号         | 博士 (学術)                                   |
| 学 位 授 与 年 月 日     | 学術 (環) 博第 28 号                            |
| 学 位 授 与 の 根 拠 法 規 | 平成 17 年 3 月 25 日                          |
| 研究科, 専攻の名称        | 学位規則第 4 条第 1 項                            |
| 学 位 論 文 題 目       | 東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 環境科学専攻              |
| 指 導 教 員           | 地質情報を用いたトンネル施工管理と多成分弾性波反射法による切羽前方予測に関する研究 |
| 論 文 審 査 委 員       | 東北大学教授 新妻 弘明                              |
|                   | 主査 東北大学教授 新妻 弘明 東北大学教授 松木 浩二              |
|                   | 東北大学教授 佐藤 源之 東北大学助教授 浅沼 宏                 |

## 論 文 内 容 要 旨

トンネル建設工事における地質調査は、主として地上からの調査であるため、その精度は必ずしも十分でないことが多い。このため、「地質情報を用いたトンネル施工管理と多成分弾性波反射法による切羽前方予測に関する研究」は、トンネル施工中、坑内で地質調査を実施し、得られた地質情報を施工に活用することで、より合理的なトンネル施工管理手法を開発することを目的とした研究である。ここで、地質調査の対象は、トンネルの品質や施工時の安全性に影響を及ぼす地質構造および地質性状とし、具体的には、一般的な道路トンネルの幅および高さが 10m 程度であることを考慮し、幅数 m 程度の破碎を伴う断層や破碎帯などの地質構造のほか、トンネル坑壁が不安定となる恐れがある多量の湧水を含む滞水層、大規模な空洞など、トンネル施工に影響を及ぼす地質構造を対象とした。

本研究では、実際のトンネル施工において、「各種の手法による掘削時の地質調査」と「地質技術者によるトンネル掘削後の詳細な地質観察」を実施することで、地質調査結果と地質構造との関係を評価し、判明した特性をトンネル施工管理に活用することを検討することを基本的な研究手法とした。ここで、地質調査手法として、既存の調査手法に加え、新しい信号処理技術である 3 次元 TFC (Time Frequency Coherency) 法のトンネルへの適用手法の開発を試みた。

まず、TBM (Tunnel Boring Machine) によるトンネル施工においては、連続的に取得される TBM 掘削データからリアルタイムに地質評価を行い、トンネル施工管理に活用する手法を検討した。この検討においては、トンネル施工時に TBM 掘削データの収集を行い、トンネル掘削後、坑壁の地質観察などから得られた地質データと比較検討を行った。ここで、TBM 掘削データは、計測データの他、岩盤強度や作業エネルギーなどへの換算値についても比較検討を行った。

TBM 掘削データと掘削後の地質調査から判明した地質データを検討した結

果、推力は岩盤等級などの地質性状と相関が高く、地質性状の評価項目となることが判明した。さらに、坑壁の安定対策工との関係を検討した結果、岩盤等級などの力学的性状のほか、トンネル湧水量といった TBM 掘削データでは把握が困難な要因が影響を及ぼしていることが判明した。

このため、TBM トンネルの施工管理においては、図-1 に示す施工管理フローのように、推力などの TBM 掘削データによりモニタリングを行い、これらに低下などの異常が認められる場合には、掘削を一時中断し、切羽付近の地質性状や湧水発生状況を把握し、場合により前方探査が実施する施工管理手法が適切と考えられた。

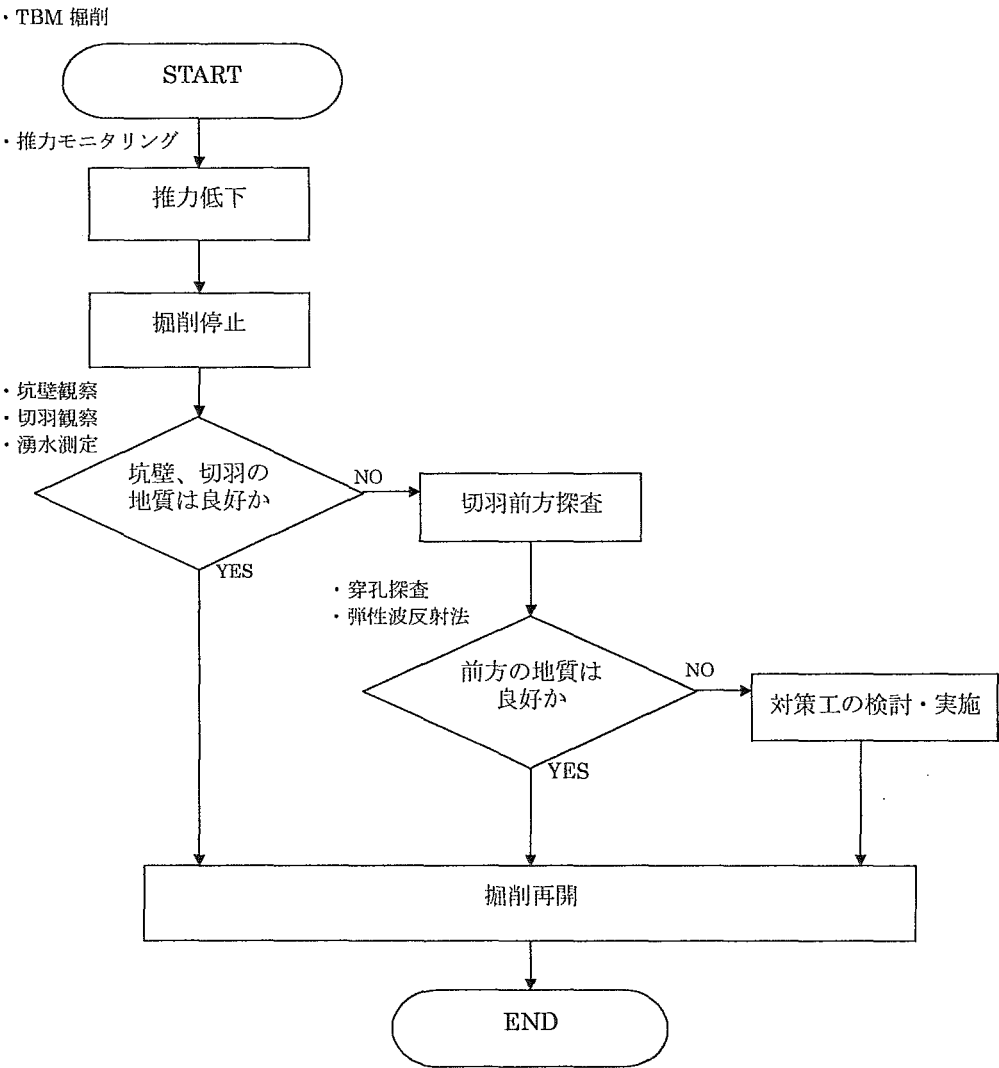


図-1 TBM 掘削における施工管理フロー

次に、トンネル内弾性波反射法のなかで、TSP ( Tunnel Seismic Prediction ) 法について、検討を行った。TFC 法は日本国内の建設工事において普及展開が進んでいるが、この探査技術の有効性についてはさまざまな意見があり、評価

が定まっていない。また、一方で、トンネル施工中の長距離探査手法として導入が容易なことから、TSP 法への期待も大きいといった状況にある。

本研究では、反射面の位置と位相変化という TSP 法の探査結果表示から、表-1 に示すような反射波の出現パターンに着目することで、断層や貫入岩などの地質構造を推定する手法を検討した。さらに、既存の地質情報と総合的に評価することで、地質区分ごとに、より詳細な地質構造推定手法について検討を行った。

また、TSP 法をトンネル施工に適用した結果を検討したところ、TSP 法による地質構造の把握率は約 60%であり、断層など比較的明瞭な地質構造ほど把握されやすいことが判明した。さらに、TSP 法により得られた地質情報を施工管理に活用することでトンネル支保設計の変更などに活用できることが判明した。

表-1 反射パターンによる地質的な意味の推定

| 反射パターン | 反射面の組合せ |     | 推定される構造 |    |
|--------|---------|-----|---------|----|
| 断層型    |         |     | 断層      |    |
| 貫入岩型   |         |     | 貫入岩     |    |
| 岩種境界 A |         |     | 硬岩      | 軟岩 |
| 岩種境界 B |         |     | 軟岩      | 硬岩 |
| 位相変化   |         |     |         |    |
| 探査方向→  | 同位相     | 逆位相 |         |    |

次に、トンネル内における測定では、反射波以外にも、さまざまな雑音が発生している。このため、反射波をより確かに検出する手法として、3次元 TFC 法をトンネル施工時の地質調査に導入することを試みた。3次元 TFC 法はコヒーレント波を検出する手法であり、この手法により、反射波の検出を可能とする解析手法であり、これまで坑井内において3軸ダブルゾンデにより計測された地下弾性波に対して適用が検討されてきた。ここで、センサの間隔は波長に比べ十分に短い距離であることが必要となるが、トンネル坑内における計測を効率的に進めるためには、計測アレイ長を大きくとり、かつ、計測点数を少なくするが必要となる。この場合、センサ間隔は大きなものとなり、任意の点で発生させた弾性波が切羽前方で反射し、各センサに到達するとき、各センサにおける反射波到達時間にずれが生ずることになる。センサ間隔として1~2mを設定した場合、3次元 TFC 法は、ホドグラムの形状に非常に敏感であるため、コヒーレント波の検出能力が低下することが考えられた。

このため、トンネル坑内における測定条件下におけるシミュレーションを行い、センサ間隔などの測定パラメータが3次元 TFC 法に与える影響について評価した。この結果から、センサ間隔による影響の低減を目的とした3次元 TFC

法における補正アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは図・2 に示すとおりで、シミュレーションにより、その特性を評価するとともに、トンネル内で取得されたデータに対して適用を検討した。この結果、得られたコヒーレント波については、極性を考慮した上、デフラクシオンスタックマイグレーションにより、反射面のイメージングを行った。この結果、得られた反射イメージは、掘削後に判明した地質構造と整合的となることが判明した。このため、3次元TFC法において時間補正を行い、トンネル内での計測に適用することで、少数のセンサによりトンネル切羽前方からの反射波の検出と到来方向を推定することが可能と考えられ、より合理的な切羽前方の予測が可能となることが考えられた。

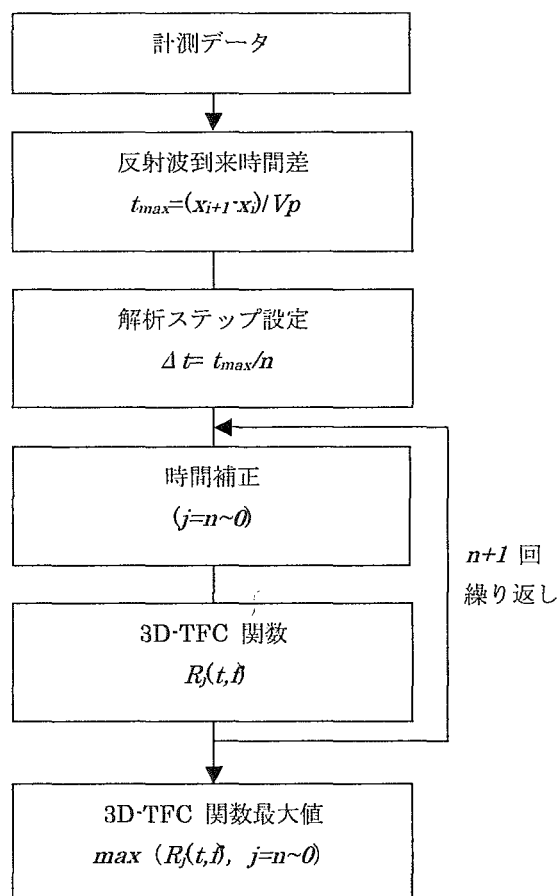


図-2 時間補正 3 成分 TFC 法の解析フロー

# 論文審査結果の要旨

人類が文化的な生活を営むために社会資本の整備が不可欠である。このなかで道路の建設時には環境影響を極力小さくするために、開削を行わず、トンネル掘削を選択する事例が多い。トンネル施工時には切羽付近の地質評価により施工管理・安全管理を行なうことが望ましいが、現実には掘削工程を長時間にわたり停止して切羽の地質観測を行なうことは困難である。本論文は、トンネルボーリングマシンの掘削データおよびトンネル坑内多成分弾性波反射法により、トンネル掘削時の施工管理ならびに切羽前方の地質構造評価を実現する手法について述べており、全5章からなる。

第1章は、緒論であり、本論文の背景、目的、既往の研究の概要と問題点、本研究における課題について述べている。

第2章では、複数の山岳トンネル掘削時にトンネルボーリングマシンから得られた実掘削データと地質情報の相関性について詳細な対比を行った結果について述べている。ここでは、推力とシュミットハンマー反発強度の間に相関性があり、さらに、推力の低下が湧水と関連している事例が多いことを新たに見出している。さらに、この結果をもとにトンネルボーリングマシンによる掘削時の施工管理フローチャートを導出している。これは、トンネル掘削時の施工管理、なかでも坑壁の安定性確保に結びつく重要な成果である。

第3章では、TSP (Tunnel Seismic Profiling) 法と呼ばれるトンネル弾性波反射法データから地質情報を取得する方法について検討を行っている。ここでは、既存の計測・解析手法の問題点について検討し、TSP法の距離および方位分解能、可探距離を改善する方法について述べている。また、実データをもとに地質情報と反射イメージの対応関係を検討した結果、反射面の性状と反射波の位相が対応していることを明らかにしている。さらに、周波数領域での解析を行なうことにより、反射面の粗さを検出できる可能性があることを述べている。これらの成果をもとに、TSP法による支保設計フローチャートを導出している。これらはトンネル掘削の高能率化および切羽の安定性確保に関する重要な成果である。

第4章では、ボアホールを用いた地下弾性波計測のために開発された、3次元時間一周波数コヒーレンス法という多成分弾性波信号処理技術をトンネル坑内弾性波反射法に導入したことについて述べている。ここでは、トンネル坑内でのセンサ配置を考慮して、従来の手法にセンサ間での遅延時間補正を組み込んだ解析法を考案し、その有効性をシミュレーションにより評価している。さらに、本手法を実データに適用し、反射イメージを地質データと対応させた結果、本手法により検出された反射体が断層とよく対応していること、また、本手法の可探距離が従来法より大きいことについて述べている。これは多成分弾性波計測によるトンネル切羽前方予測に関する重要な成果である。

第6章は結論である。

以上、要するに、本論文は、社会資本の施工時における環境影響を小さくする上で重要なトンネル掘削において、地質情報および弾性波計測をもとにした施工管理技術・切羽前方予測技術を発展させたことについて述べており、地下工学ならびに環境科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(学術)の学位論文として合格と認める。

